

EXTRACCIÓN DE DERIVADAS DE ORDEN SUPERIOR EN GaAs MESFET's

Andrea Gutiérrez Ontañón⁽¹⁾, Inés Ibarguren Segovia⁽¹⁾, Tomás Fernández Ibáñez⁽¹⁾, Angel Mediavilla Sánchez⁽¹⁾, Jose Angel García García⁽¹⁾, Giorgio Vanini⁽²⁾, Fabio Filicori⁽³⁾

andrea.gutierrez@alumnos.unican.es, ines.ibarguren@alumnos.unican.es, fernandt@unican.es, media@dicom.unican.es,

(1) Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. E.T.S.I.I.T, Avda Los Castros s/n, 39005, Santander

(2) Dipartimento di Ingegneria-Università di Ferrara

(3) Dipartimento di Electronica Informatica e Sistemistica-Università di Bologna

Abstract- In the design of Power amplifiers, the exhibition of very low IMD content is extremely important and the main responsible for IMD is at least the evolution of the third order derivatives concerning the active device (transistor). This document contains information concerning a method of extraction of Static High Order Derivatives of the drain-source current I_{ds} of a MESFET transistor, from first to third order. After a brief description of how to obtain the derivatives analytically, a CAD Implementation has been performed for this purpose. The testbench has been implemented on both Agilent-ADS and MWOoffice CAD simulators.

I. INTRODUCCIÓN

En los sistemas de comunicaciones de RF y microondas de hoy en día, uno de los factores más importantes a tener en cuenta es la distorsión de intermodulación. Es probablemente el fenómeno no lineal principal para los diseñadores de dispositivos activos de alta frecuencia. Para poder minimizar esta distorsión de intermodulación, es necesario tener bien caracterizado el dispositivo activo (transistor). Partiendo del circuito no lineal equivalente del transistor, que puede verse en la Fig1., se estudiará la fuente de corriente de drenador a surtidor, I_{ds} , y a través del desarrollo en serie de Taylor, podrá comprobarse que son sus derivadas hasta tercer orden las que influyen en la distorsión de intermodulación del amplificador de potencia.

El objetivo es por tanto la implementación de un circuito para la medida y caracterización de las derivadas de orden superior de la corriente I_{ds} . Este circuito se implementará en los simuladores comerciales ADS de Agilent y MWOoffice de AWR obteniendo los mismos resultados.

II. MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE DERIVADAS DE ORDEN SUPERIOR

A. Desarrollo analítico

En la Fig.1 puede observarse el circuito equivalente de un transistor HEMT. La no linealidad más importante es la fuente de corriente $I_{ds}(V_{gs}, V_{ds})$, ésta puede representarse con un desarrollo en serie de Taylor bidimensional, siendo suficiente hasta el tercer orden, como puede verse en la ecuación (1).

$$I_{ds}(V_{gs}, V_{ds}) = I_{DS}(DC) + g_m v_{gs} + g_{ds} v_{ds} + g_{m2} v_{gs}^2 + g_{md} v_{gs} v_{ds} + g_{d2} v_{ds}^2 + g_{m3} v_{gs}^3 + g_{m2d} v_{gs}^2 v_{ds} + g_{md2} v_{gs} v_{ds}^2 + g_{d3} v_{ds}^3 \quad (1)$$

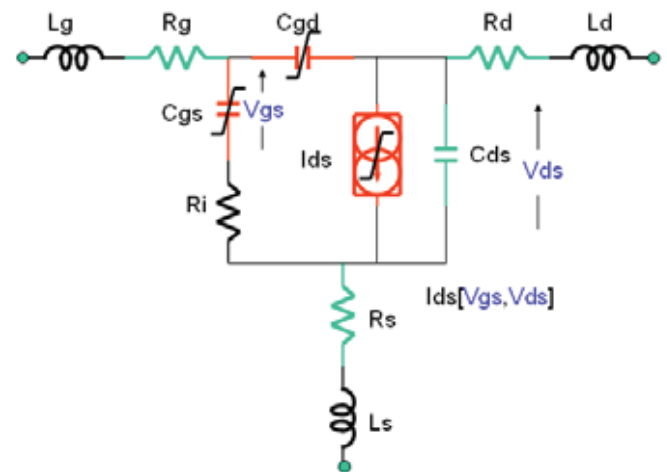


Fig. 1. Circuito equivalente de un transistor GaAs MESFET

Las derivadas vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} g_{m1} &= \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \right|_{V_{gs0}, V_{ds0}} & g_{d1} &= \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{ds}} \right|_{V_{gs0}, V_{ds0}} \\ g_{m2} &= \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I_{ds}}{\partial V_{gs}^2} \right|_{V_{gs0}, V_{ds0}} & g_{md} &= \left. \frac{\partial^2 I_{ds}}{\partial V_{gs} \partial V_{ds}} \right|_{V_{gs0}, V_{ds0}} \\ g_{d2} &= \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I_{ds}}{\partial V_{ds}^2} \right|_{V_{gs0}, V_{ds0}} & g_{m3} &= \left. \frac{1}{6} \frac{\partial^3 I_{ds}}{\partial V_{gs}^3} \right|_{V_{gs0}, V_{ds0}} \\ g_{m2d} &= \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^3 I_{ds}}{\partial V_{gs}^2 \partial V_{ds}} \right|_{V_{gs0}, V_{ds0}} & g_{md2} &= \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^3 I_{ds}}{\partial V_{gs} \partial V_{ds}^2} \right|_{V_{gs0}, V_{ds0}} \\ g_{d3} &= \left. \frac{1}{6} \frac{\partial^3 I_{ds}}{\partial V_{ds}^3} \right|_{V_{gs0}, V_{ds0}} \end{aligned} \quad (2)$$

Aplicando el método de las corrientes no lineales podemos llegar a las ecuaciones que nos permitirán la obtención de las derivadas de orden superior. Se va a excitar

al transistor con generadores en puerta y drenador a frecuencias bajas para no tener en cuenta las no linealidades de los elementos capacitivos del esquema, ya que éstos serán considerados circuitos abiertos y las inducciones cortocircuitos. El circuito resistivo equivalente resultante se muestra en la Fig.2.

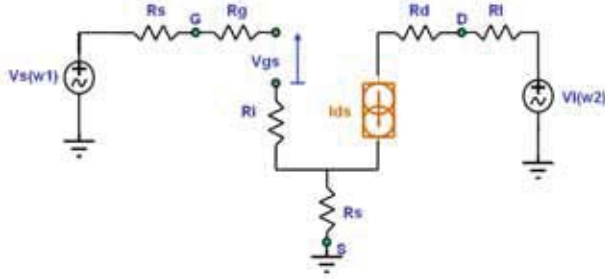


Fig. 2. Circuito equivalente no lineal resistivo del FET a frecuencias bajas, con excitación sinusoidal en puerta y drenador.

Sustituyendo en el circuito de la Fig.2 los términos lineales de la fuente de corriente i_{ds} en (1) por una fuente lineal de corriente dependiente de tensión, $gm_1 \cdot v_{gs}$, en paralelo con una conductancia lineal gd_1 , y los términos de grado mayor que 1 por fuentes no lineales de corriente, una para cada orden, obtendremos el circuito de la Fig.3.

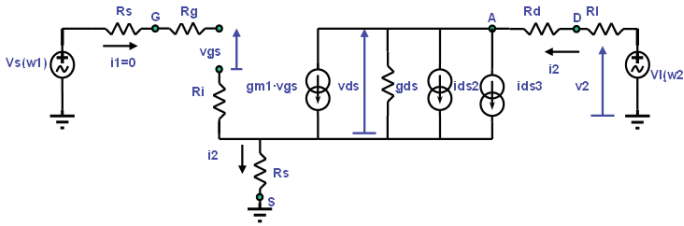


Fig. 3. Circuito equivalente no lineal resistivo del FET en pequeña señal, de acuerdo al método de las corrientes no lineales, con excitación sinusoidal a $w=w_1$ en puerta y a $w=w_2$ en drenador.

Ahora se aplica el método de las corrientes no lineales y se expresan los voltajes de control v_{gs1} y v_{ds1} como combinación lineal de las respuestas a v_s y v_l (3)

$$\begin{aligned} v_{gs1} &= K_{gs} \cdot v_s + K_{gl} \cdot v_l \\ v_{ds1} &= K_{ds} \cdot v_s + K_{dl} \cdot v_l \end{aligned} \quad (3)$$

Se aplica el principio de superposición, considerando un único estímulo cada vez, y entonces se obtendrán gm_1 y gd_1 que son las derivadas de orden 1 de I_{ds} (4).

$$\begin{aligned} v_{gs(w1)} &= v_{s(w1)} - i_{2(w1)} \cdot R_s = A_{11} \\ v_{ds(w1)} &= -i_{2(w1)} \cdot (R_s + R_d + R_l) = A_{12} \\ v_{gs(w2)} &= -i_{2(w2)} \cdot R_s = A_{21} \\ v_{ds(w2)} &= v_{l(w2)} - i_{2(w2)} \cdot (R_s + R_d + R_l) = A_{22} \\ gm_1 &= \frac{i_{2(w1)} \cdot A_{22} - i_{2(w2)} \cdot A_{12}}{A_{11} \cdot A_{22} - A_{12} \cdot A_{21}} \\ gd_1 &= \frac{i_{2(w2)} \cdot A_{11} - i_{1(w1)} \cdot A_{21}}{A_{11} \cdot A_{22} - A_{12} \cdot A_{21}} \end{aligned} \quad (4)$$

El procedimiento de extracción de las segundas derivadas se basará en medidas a las frecuencias $2w_1$, w_1+w_2 y $2w_2$, situadas en lo que denominaremos segunda banda, en orden

creciente de frecuencia y a una separación igual a w_2-w_1 entre cada dos consecutivas. Para la extracción de las terceras derivadas usaremos las mediciones de potencia en las frecuencias $3w_1$, $2w_1+w_2$, w_1+2w_2 y $3w_2$, ubicadas en la tercera banda, en el mismo orden y con la misma separación referida para la banda anterior.

De este modo se llega a una ecuación matricial donde se expresan los denominados coeficientes generalizados, que relacionan las amplitudes de cada una de las corrientes no lineales con las de las excitaciones respectivas, como el producto de una matriz de coeficientes $[K_{G2}]$ por los coeficientes asociados a las derivadas de segundo orden (gm_2 , gmd y gd_2), como se ve en (5)

$$\begin{bmatrix} G_{2(2w1)} \\ G_{2(w1+w2)} \\ G_{2(2w2)} \end{bmatrix} = [K_{G2}]_{3 \times 3} \begin{bmatrix} gm_2 \\ gmd \\ gd_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Y lo mismo para extraer los coeficientes asociados a las derivadas de tercer orden, donde la ecuación matricial viene dada por (6).

$$\begin{bmatrix} G_{3(3w1)} \\ G_{3(2w1+w2)} \\ G_{3(w1+2w2)} \\ G_{3(3w2)} \end{bmatrix} = [G_1]_{4 \times 3} \begin{bmatrix} G_{2(2w1)} \\ G_{2(w1+w2)} \\ G_{2(2w2)} \end{bmatrix} + [K_{G3}]_{4 \times 4} \begin{bmatrix} gm_3 \\ gm_2 d \\ gmd_2 \\ gd_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[G_1] = \begin{bmatrix} G_{1(w1)} & 0 & 0 \\ G_{1(w2)} & G_{1(w1)} & 0 \\ 0 & G_{1(w2)} & G_{1(w1)} \\ 0 & 0 & G_{1(w2)} \end{bmatrix}$$

$$G_{1(w1)} = 2 \cdot gm_2 \cdot K_{gs} \cdot K_{rg} + gmd \cdot (K_{gs} \cdot K_{rd} + K_{rg} \cdot K_{ds}) + 2 \cdot gd_2 \cdot K_{ds} \cdot K_{rd}$$

$$G_{1(w2)} = 2 \cdot gm_2 \cdot K_{gl} \cdot K_{rg} + gmd \cdot (K_{gl} \cdot K_{rd} + K_{rg} \cdot K_{dl}) + 2 \cdot gd_2 \cdot K_{dl} \cdot K_{rd}$$

Estas serán las ecuaciones que se tienen que introducir tanto en MWOoffice como en ADS para el cálculo de los coeficientes asociados a las derivadas de orden superior.

El método de extracción de derivadas experimental se muestra en la Fig.4. Los esquemáticos realizados en los simuladores son de hecho una implementación CAD del circuito de medida de la Fig.4.

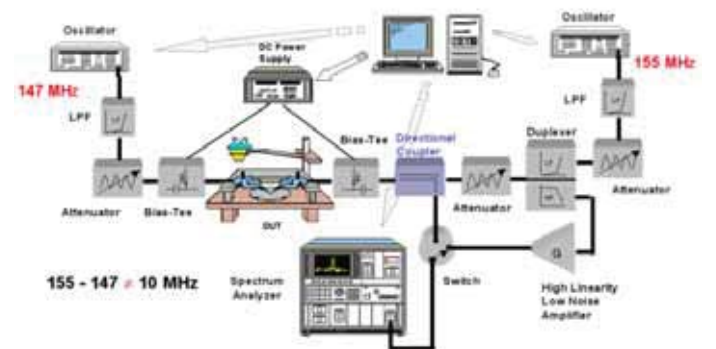


Fig. 4. Circuito de medida de las Derivadas de Orden Superior

B. Implementación en MWOOffice

Como elemento de prueba, se va a utilizar un transistor MESFET, modelado utilizando la bien conocida expresión de fuente de corriente propuesta por Angelov [4].

La implementación en el simulador se hace a través del esquemático correspondiente, mostrado en la Fig.3 donde se puede observar que se han utilizado dos puertos de balance armónico en los terminales de puerta y drenador para poder suministrar la potencia y tensión necesarias siguiendo la ecuación (3), que se especificará en las *Global Definitions*, del proyecto creado en MWOOffice.

La frecuencia de operación en la puerta se ha fijado a un valor de 150MHz mientras que en el Terminal de drenador será de 155MHz, con objeto de poder generar los distintos niveles de intermodulación.

$$\begin{aligned} V_{gen_G} &= (10^{(P_{gen_G}/10)}) / (1000 \cdot 8 \cdot R_{gen_G})^{0.5} \\ V_{gen_D} &= (10^{(P_{gen_D}/10)}) / (1000 \cdot 8 \cdot R_{gen_D})^{0.5} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_{gen_G} &= -30 & P_{gen_D} &= -30 \\ R_{gen_G} &= 50 & R_{gen_D} &= 1 \end{aligned}$$

Los valores de Pgen y Rgen se han elegido de forma que se asegure la línea de operación del transistor, así no se observará distorsión en las magnitudes medidas.

La corriente Ids así como todas sus componentes de segundo y tercer orden, pueden medirse en el medidor I_METER.Idrain. Por ejemplo, la componente a la frecuencia w1 vendrá dada por la ecuación:

$$IDSW1 = DERIVATIVES:Re(Icomp(I_METER.Idrain,1_0))[1,X]$$

que se especificará en la *Output equations*.

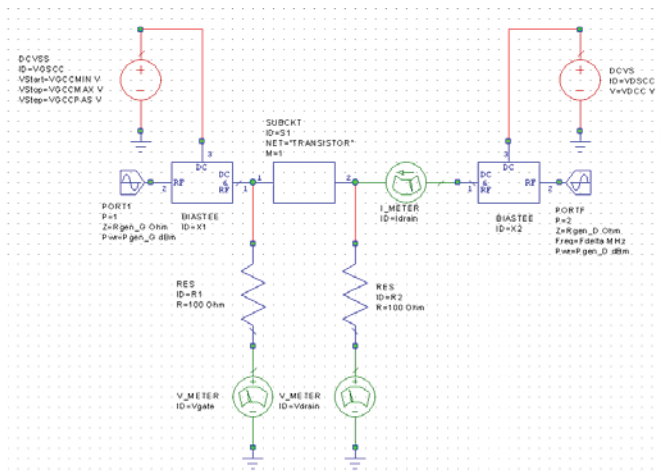


Fig. 5. Implementación del circuito de medida de derivadas de orden superior en MWOOffice

En el bloque *Output Equations* del proyecto estarán definidas todas las ecuaciones necesarias para obtener las derivadas así como funciones específicas para ello, como son el cálculo de determinantes de 2x2 y 3x3. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas, donde se representan las derivadas en función de la tensión de control Vgs.

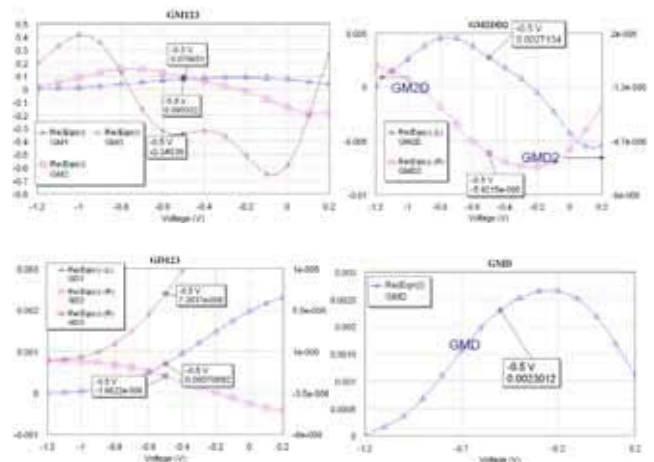


Fig. 6. Derivadas de orden superior de Ids resultado de la simulación en MWOOffice.

C. Implementación en ADS

El circuito que se va a implementar y la forma de hacerlo va a ser igual que en el caso anterior pero con algunas diferencias. La primera de ellas es que para poder definir las funciones que calculan los determinantes, es necesario hacer uso de un fichero de extensión .ael denominado *user_defined_fun.ael*, que contenga estas definiciones, y habrá que incluirlo en el directorio correspondiente (C:\ADS2004\expressions\ael\user_defined_fun.ael).

El lenguaje AEL es un lenguaje de programación de propósito general, modelado después del conocido lenguaje de programación C. Tiene un amplio abanico de librerías de funciones construidas, que incluyen funciones para los ficheros de entrada y salida, funciones matemáticas, manipulación de series, manejo de listas y cuestiones de bases de datos. Además de para definir funciones, se usa para definir componentes, organizar librerías y paletas de componentes, automatización de tareas etc.

En nuestro caso se utilizará el lenguaje AEL para definir todas aquellas funciones matemáticas que no vengan implementadas en el simulador ADS (por ejemplo cálculo de determinantes) y que deban operar con voltajes y/o corrientes del circuito usado en la extracción de las derivadas (figura 5).

En la Fig.7 se puede ver el esquemático que permite la extracción de las derivadas. En este caso, se emplean dos generadores V_1Tone tanto en el Terminal de puerta como en el de drenador, que se utilizan para simulaciones de distorsión de intermodulación. Se eligen 9 armónicos para la simulación, y para el cálculo de Ids y de sus componentes, es necesario generar una tabla de frecuencias de la cual se seleccionará el orden correspondiente. Así por ejemplo, se selecciona el orden 7 para la frecuencia fundamental de 150MHz (4):

$$\text{Eqn } IDSW1 = \text{real}(Idrain.i[7]) \quad (8)$$

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren hacer público su agradecimiento a los siguientes proyectos, dentro de los cuales se han obtenido los resultados presentados en este artículo:

- NoE TARGET (IST program of the EU under contract IST-1-707893-NOE).
- TEC2005-07985-C03-01, Ministerio de Educación y Ciencia

REFERENCIAS

- [1] Manual Simulador Advanced Design System 2004A
- [2] Manual Simulador MWOOffice™
- [3] Vicentiu I. Cojocaru, Thomas J. Brazil, "Improved prediction of the intermodulation distortion characteristics of MESFETs and PHEMTs via a robust nonlinear device model", IEEE MTT-S Digest, pp. 749-752, 1998.
- [4] Ilcho Angelov, Herbert Zirath, Niklas Rorsman, "Validation of nonlinear transistor model by power spectrum characteristics of HEMT's and MESFET's", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 43, no. 5, pp. 1046-1052, May 1995.

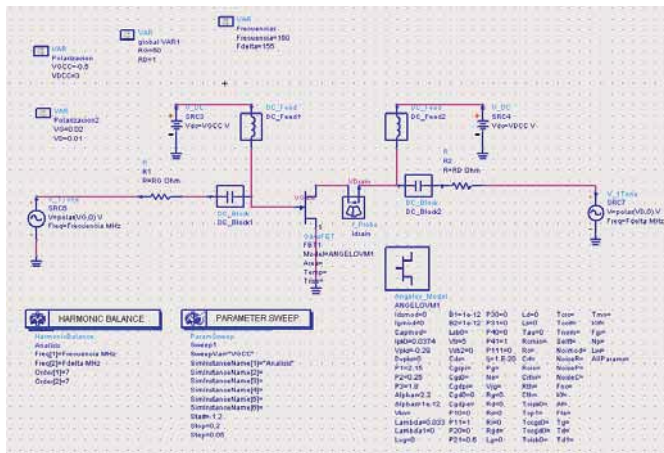


Fig. 7. Implementación del circuito de medida de derivadas de orden superior en ADS

A continuación se observan las gráficas obtenidas tras la simulación, que coinciden con las obtenidas en MWOOffice.

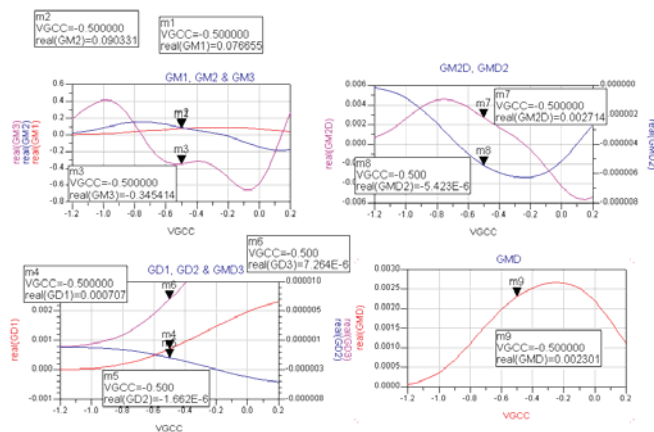


Fig. 8. Derivadas de orden superior de I_{ds} resultado de la simulación en ADS.

III. CONCLUSIONES

El sistema de medida propuesto para la extracción de derivadas de orden superior, nos permite realizar una caracterización realista del comportamiento no lineal de los transistores utilizados en microondas; puesto que la extracción de derivadas basada en medidas de régimen de DC es inadecuada para simulaciones de RF, debido a la dispersión de baja frecuencia de los transistores. La caracterización experimental de las derivadas de las no linealidades presentes en los transistores FET nos permitirá describir fielmente su comportamiento no lineal, posibilitando con ello una predicción adecuada de la distorsión de intermodulación.

Hoy en día, la simulación de circuitos está cobrando mucha importancia, y el hecho de disponer de modelos apropiados para representar a los transistores marcará su utilidad. Se ha comprobado cómo se puede implementar el circuito de extracción de derivadas en los simuladores comerciales MWOOffice y ADS, obteniendo los mismos resultados.